



**Impacto del Cambio Climático sobre la Seguridad
Alimentaria en Colombia: un Análisis Topológico de
Redes de Transporte en la Cadena Agroalimentaria**

Felipe González Esquivel

Asesorado por:

Juan Carlos Muñoz Mora

Departamento de Economía

Universidad EAFIT

Colombia

2020

Contenido

1. Introducción	2
2. Revisión de Literatura	4
3. Metodología	7
3.1. Topología de las Redes de Comercio Agrícolas	7
3.2. Topología de la Red Vial y los Derrumbes	9
3.3. Modelamiento del Nivel de Precios	10
4. Datos y Fuentes de Información	11
4.1. Fuentes de Datos	11
4.2. Análisis Descriptivo de los Datos	12
5. Análisis Topológico de Redes	15
6. Resultados del Modelamiento del Nivel de Precios	21
7. Conclusiones y Consideraciones Finales	24
Referencias	26

Abstract

La inseguridad alimentaria en es una realidad en Colombia aun siendo un país con una variedad envidiable de ecosistemas agrícolas que facilitan la cosecha de todo tipo de alimentos. El problema no radica en la cantidad producida sino en las ineficiencias de las cadenas agroalimentarias en la distribución de la producción. Estas ineficiencias están en riesgo de empeorar debido al cambio climático, los eventos extremo-climáticos en las carreteras comprometen el tránsito de mercancías y dificultan aún más el acceso de las poblaciones periféricas a los alimentos básicos. El presente trabajo analiza el efecto que tiene la integración de los mercados y los eventos climáticos sobre los precios finales de los alimentos haciendo uso de métricas de topología de redes. Concluyo que una mayor integración logra disminuir los precios de los alimentos y que los derrumbes en las vías no tienen efecto significativo sobre los precios finales de los alimentos.

1. Introducción

En Colombia una de las mayores causas de la inseguridad alimentaria no radica en la escasez, sino en la imposibilidad de acceder a los alimentos. Las poblaciones más pobres y vulnerables se encuentran en las periferias de los centros urbanos y en el campo, haciéndolos especialmente vulnerables a los factores que determinan la sostenibilidad y suficiencia de los alimentos básicos (DNP, 2019).

Las ineficiencias en las cadenas de abastecimiento observadas en Colombia se agudizan por los cambios en las condiciones ambientales que toman forma de derrumbes, erosiones y fenómenos climáticos severos como *La Niña* o *El Niño*. Estos eventos extremo-climáticos representan cierres parciales o completos de los corredores viales que movilizan la producción agrícola de un municipio hacia los mercados finales de otro. Es de esperarse que estas perturbaciones aumenten los costos de transportar mercancía entre los municipios, lo que se refleja en mayores precios en los mercados finales.

La infraestructura de transporte tiene el papel de soportar la integración de los mercados de manera que sean resilientes ante eventos extremo-climáticos. Esta necesidad es urgente en Colombia, puesto que las carreteras transportan el 77 % del total de la carga comerciada (Cortazar-Gomez and Pineda-Guarín, 2019) y en el país los derrumbes y erosiones de tierra

en las vías son frecuentes por la geografía montañosa que posee y los centros urbanos, al concentrarse en la parte central del territorio sobre la Cordillera de los Andes, los hace más susceptibles a estos fenómenos climáticos. Un ejemplo extremo fue el del fenómeno de la Niña, que durante 2010 y 2011 represento, en cierres y desvíos, pérdidas de alrededor de \$222 millones de dólares (Minambiente, 2014).

Este trabajo busca analizar los precios finales de las diferentes agrupaciones de productos agrícolas en las centrales de abasto de los municipios en función de la integración del mercado nacional de cada agrupación, el papel del municipio dentro de cada mercado y las perturbaciones climáticas en las vías. Para lograr ese objetivo se hizo uso de topología de redes para describir la red de comercio municipal de cada agrupación, esta metodología consiste básicamente en caracterizar un conjunto de nodos (municipios) conectados por medio de aristas (flujos de comercio). El uso de topología de redes, que aún carece de penetración en los estudios económicos, permite obtener insumos útiles para el modelamiento de diferentes fenómenos económicos, como los mismos determinantes de los flujos de comercio entre departamentos (Cortazar-Gomez and Pineda-Guarín, 2019). Estos insumos, que no son más que las estadísticas descriptivas de la red, permiten no solo cuantificar la estructura de la red en general sino también la importancia de cada nodo dentro de ella. Por otro lado, se utiliza la información de la red vial primaria para construir los corredores de comercio de mercancía entre los municipios e identificar cuáles de ellos pudieron ser afectados por un derrumbe. De esta manera, este trabajo plantea que, en Colombia, los cambios en temperatura y patrones de precipitación a raíz del cambio climático aumentan la frecuencia y severidad de derrumbes y deslizamientos, generando mayores costos transporte por las restricciones a la movilidad que representan sobre las vías, ocasionando una pérdida de bienestar a los consumidores finales a través de precios de los alimentos más altos.

El presente trabajo aunque no analice detalladamente cada producto sirve como punto de partida para futuros trabajos que si lo hagan. De igual manera, no considera la totalidad de las vías y troncales que conectan los municipios, de hecho solamente el 8 % de las vías en el país son primarias (Minambiente, 2014), lo que excluye la mayoría de conexiones, en especial las dadas entre municipios periféricos. Aun así, este estudio concluye que una mayor integración del mercado, medido por el número de flujos directos de comercio en la red tiene

un efecto negativo sobre los niveles de precios de todo tipo de alimento y por ende disminuye el riesgo de inseguridad alimentaria gracias a la mayor asequibilidad. Además, los derrumbes “corrientes”, cuyo efecto sobre la vía no demora más de un mes, no demuestran tener un efecto significativo en los precios en los mercados finales, sin embargo, no se descarta que eventos climáticos severos cuya duración sea de varios meses si lo tenga.

El restante de este trabajo se compone de una revisión de literatura, donde además se resaltan los diferentes enfoques abordados en el análisis del efecto del cambio climático sobre los precios finales de los alimentos, seguido de una descripción de la metodología y de las métricas de topología de redes utilizadas. Posteriormente se describen las fuentes de información, sus limitantes y un análisis básico del comportamiento histórico de los precios, seguido del análisis topológico de las redes de comercio, los resultados del modelamiento econométrico y finalmente se mencionan las conclusiones y consideraciones finales del trabajo.

2. Revisión de Literatura

La cadena agroalimentaria está construida por los eslabones de producción, transformación, distribución, comercialización y consumo de los alimentos agrícolas. La red de infraestructura vial permite el funcionamiento del mercado a través de la articulación de todos esos eslabones. El impacto de la conectividad y perturbaciones en la red de los mercados agrícolas se ha analizado desde el enfoque del productor, del intermediador y el consumidor final.

Desde la producción, el impacto se observa en las decisiones de cultivo de las fincas; las más cercanas a los centros urbanos dedican su terreno a cultivar productos para comerciar (ej. caña de azúcar o café) mientras que las fincas más alejadas cultivan alimentos para su propia subsistencia (ej. tubérculos). Al dedicarse a comerciar, las fincas se especializan en un tipo de cultivo donde logran economías a escala y aumentan su productividad, generando un efecto tecnológico positivo sobre el terreno (Gafaro and Pellegrina, 2018). De este modo, los costos de transporte asociados a una red de transporte deficiente afectan la productividad marginal de la mano de obra como insumo intensivo en la agricultura. Adamopoulos (2011) argumenta que una red vial ineficaz causa que los factores productivos no se asignen de manera eficiente

entre la producción agrícola y la no agrícola. El *problema de la comida*, que se presenta en los países más pobres al dedicar la mayoría de su población a trabajar en el campo y tener rendimientos marginales nulos, puede solucionarse si se asegura la conectividad de la red de comercio entre regiones. Las regiones que no tengan ventaja comparativa en la producción agrícola pueden dedicar sus recursos a la actividad que sí la tenga e importar los alimentos de regiones en donde se de bien la agricultura.

La infraestructura pública de transporte también puede ser visto como un factor productivo que tiene un efecto complementario y sustituto sobre los insumos químicos utilizados por las fincas. Wu et al. (2019) demostraron que las fincas chinas al tener mayor acceso al mercado, recurren menos a pesticidas y fertilizantes cuyo uso intensivo tiene consecuencias negativas sobre los suelos y las fuentes de agua.

El impacto también se ha estudiado desde el enfoque del intermediador que, para el caso colombiano, es relevante por la importancia que tiene este actor en el mercado agrícola. Por ser dispersas y poco articuladas las fincas, el intermediador tiene el papel de recolectar la producción agrícola y comercialarla con los distribuidores en los centros urbanos. Los intermediarios al estar más articulados dentro de la red logran obtener mayores ganancias y además una red más conectada permite recaudar mayores tributos del comercio en el caso de que el intermediario sea una concesión vial y el mecanismo de recaudo sean peajes (Cardoso et al., 2020).

El último enfoque revisado trata del efecto que tiene la conectividad y perturbaciones en la red agrícola sobre el consumidor final. La mayoría de los trabajos investigativos con este enfoque han analizado el comportamiento de los precios finales de los alimentos entre diferentes regiones a raíz de una infraestructura vial insuficiente. Esto debido a que los costos de transporte altos causan grandes disparidades en los precios de productos homogéneos entre mercados relativamente cercanos, generando pérdidas de bienestar en las poblaciones. Porteous (2019) sugiere que una infraestructura de transporte semejante a la de países desarrollados en los países subsaharianos generaría una ganancia de bienestar por menores precios en los alimentos superior a la pérdida por causa del desplazamiento de empleos dedicados a la agricultura ante una mayor entrada de bienes importados.

Las disparidades en los precios de productos como el pescado se deben también a su

origen, que determina los mercados a los cuales se dirige la oferta; si la pesca es artesanal, se destina a los mercados locales y si proviene de criaderos, se comercia externamente. Los precios de la pesca enfocada para comerciar interregionalmente son menos dispersos y volátiles que los precios de la pesca comerciada intrarregionalmente (Rajeev and Nagendran, 2020). La infraestructura vial tiene incidencia porque facilita el comercio, y su mayor desarrollo conllevaría a que las disparidades de precios disminuyan.

El presente trabajo de investigación pretende analizar el efecto que tienen las perturbaciones climáticas en la infraestructura vial sobre el bienestar del consumidor final. Las perturbaciones climáticas tienen cada vez mayor incidencia y magnitud debido al cambio climático, lo que ha incrementado la pertinencia de trabajos que analicen el impacto de estas perturbaciones sobre los mercados agrícolas. Dolfing et al. (2019) analizaron el efecto de la topología de la red y variabilidad de recursos sobre el acceso a los mismos y el crecimiento de la población haciendo uso de un modelo de crecimiento poblacional. Sus resultados demuestran que la centralidad de los nodos está correlacionado con la capacidad poblacional por la mayor disponibilidad a recursos a través del comercio. Estos nodos más centrales también son los menos afectados por volatilidad y choques en la oferta porque pueden acceder a diferentes fuentes con facilidad. Los nodos cuya población depende del insumo de pocos nodos, es decir que tienen menor centralidad, están más expuestos a los efectos negativos de choques y volatilidad en la producción de alimentos. Un caso real de ésta situación se pueden evidenciar en la red del mercado agrícola en Mozambique durante sequías e inundaciones. Salazar et al. (2019) indican que la disparidad de precios entre mercados aumenta durante periodos de inundaciones a causa de mayores costos de transporte, y que este efecto es más pronunciado cuando hay menor distancia entre los mercados y la infraestructura vial es deficiente.

Por otro lado, el trabajo realizado por Schaub and Finger (2020) contrasta entre las características del mercado del heno y de los granos; el primero por tratarse de un producto con baja carga proteínica, no es usualmente transportado en largas distancias y es comercializado principalmente en los mercados locales. Mientras que los granos, por el contrario, tienen alta carga calórica y son comerciados interregionalmente. Al medir el efecto sobre los precios de estos dos productos ante sequías, los autores encuentran que el precio del heno aumenta

sustancialmente (+15 %) ante sequías mientras que los precios de los granos resultan inafectados. Los resultados evidencian que los precios en los mercados poco integrados debido a los altos costos de transporte, son más sensibles a las sequías.

Analizar el efecto que tiene el cambio climático sobre los mercados agrícolas ha cobrado importancia por la presencia de fenómenos climáticos más recientes y pronunciados. La literatura demuestra que este efecto puede variar por las condiciones de integración del mercado que están en función de la infraestructura vial y las características del producto. Los trabajos enfocados en el efecto sobre consumidor final demuestran que los precios de los alimentos reflejan la conectividad de la red del mercado agrícola; estos tienden a tener mayor volatilidad y nivel ante una perturbación externa si la red o conexiones (tratándose de un segmento de la red) carece(n) de integración. Este estudio al enfocarse en las perturbaciones climáticas sobre la infraestructura de transporte, analiza la vulnerabilidad de la red vial en Colombia ante dichos fenómenos y su impacto sobre los mercados finales.

3. Metodología

3.1. Topología de las Redes de Comercio Agrícolas

El análisis topológico consiste en caracterizar una red de objetos conectados entre ellos. Una red se compone de n elementos conectados por medio de g aristas, que puede ser representada como $G(N, g)$, donde $N = (1, 2, \dots, n)$ y $g = [g_{ij}]$; $i, j \in N$. Para el caso del mercado agrícola, los nodos son los municipios y las aristas están dadas por el flujo de un producto (k) transportado por carretera desde un municipio de origen (i) a un municipio de destino (j) durante un periodo (t). Al tratarse de una grafo dirigido, el flujo saliente de mercancía del municipio i hacia el municipio j difiere del flujo entrante al municipio i desde el municipio j , es decir, $g_{ij} \neq g_{ji}$.

Una red se representa matemáticamente en una matriz de adyacencia (A) de dimensiones $n \times n$ que toma los valores de:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si } g_{ij} \text{ existe} \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Para cada producto k y periodo t existe una matriz de adyacencia A_{kt} . Los valores distintos a cero se reemplazan por la cantidad de kilogramos/galones de producto k comercializado entre los municipios durante el periodo t . La información en la matriz de adyacencia permite obtener estadísticas descriptivas que caracterizan la red, conexiones y nodos del mercado de cada producto a través del tiempo. Estas métricas nos permitirán analizar las características de conectividad de la red, los municipios (nodos) más dependientes e independientes de la producción externa, entre otras inferencias. Las métricas de topología de red pueden enfocarse en la totalidad de la red o en cada nodo:

- Métricas del estado y conectividad de la red:
 - Densidad (δ): número total de conexiones en la red como proporción del número de conexiones posibles ($n * (n - 1)$). El valor de densidad de una red puede estar entre 0 y 1; una densidad igual a uno en una red dirigida implica que todos los nodos tienen conexiones dirigidas en ambos sentidos con todos los demás nodos de la red. Esta relación permite conocer el grado de integración de un mercado y la variedad de fuentes de producción que puede tener un producto.
- Métricas del estado y conectividad de cada nodo:
 - Grado de entrada (γ_{in}) y de salida (γ_{out}): es el número de conexiones directamente provenientes desde otros nodos y el número de conexiones directamente salientes hacia otros nodos respectivamente. Para ambos, los valores que pueden tomar están entre 0 y n .
 - Intensidad de entrada (ϕ_{in}) y de salida (ϕ_{out}): es la suma por columnas (entrada) y filas (salida) de los elementos de la matriz de adyacencia con los valores de la variable que representa las conexiones, en nuestro caso son las toneladas/galones transportadas por carretera. Estos indicadores permiten conocer el balance comercial de cada municipio para cada producto.
 - Coeficiente de agrupamiento (θ): mide la probabilidad que dos nodos que tengan una conexión directa al nodo (nodos vecinos) tengan una conexión directa en-

tre ellos. Puede verse como la probabilidad en que dos socios comerciales de un municipio sean socios comerciales entre ellos.

- Cercanía de entrada (ρ_{in}) y de salida (ρ_{out}): es una medida de centralidad que representa el inverso del número de conexiones en un mismo sentido dentro del camino más corto que conecta dos nodos. Puede verse como el inverso del mínimo número de conexiones que hay que “tomar” para llegar desde un nodo i a un nodo j , que, al tratarse de un grafo dirigido, puede diferir del número de conexiones que haya que tomar para llegar desde el nodo j al nodo i .
- Intermediación (σ): mide el número de veces en que un nodo se encuentra dentro de los caminos más cortos que separan todos los demás nodos de la red. Al igual que la cercanía, valores altos representan un mayor grado de integración del nodo dentro de la red.

3.2. Topología de la Red Vial y los Derrumbes

Para el caso de la Red Vial, los nodos son los municipios y las aristas están dadas por las vías y carreteras que los conectan. Dado que las vías que hacen parte de esta red son primarias, es posible generalizar un doble sentido en las aristas. De esta manera, una vía que conecta a un municipio i con el municipio j es la misma que conecta al municipio j con el municipio i , es decir, $g_{ij} = g_{ji}$. En este caso consideraríamos a la Red Vial Nacional como un grafo no dirigido.

Los nodos en la red de vías que representan los municipios son las coordenadas de ésta que están más cerca a los centros poblados. Un limitante de este enfoque es la resultante falta de conexiones entre los nodos de municipios vecinos, por ejemplo, solamente basándose en la red vial primaria, no existe una conexión directa entre los municipios del Valle de Aburra en Antioquia cuando es claro que por su cercanía geográfica deberían de existir. A raíz de esto, este trabajo utilizó la metodología de agrupamiento de K-medias para determinar los clústeres de centros poblados de distintos municipios que se encuentran a una distancia relativamente corta como, por ejemplo, el Valle de Aburra. De esta manera se agregan artificialmente las conexiones entre municipios cercanos a la red vial primaria.

Incorporamos los derrumbes a la red vial mediante un radio de impacto desde la coordenada donde ocurrió o se reportó. Este radio está determinado por un parámetro $\mu = 5$ que representa la distancia en kilómetros hasta donde tuvo efecto el derrumbe. Suponemos entonces que un derrumbe tuvo afectación sobre una vía si una coordenada ubicada en el trayecto de la misma se encuentra dentro del radio de impacto.

3.3. Modelamiento del Nivel de Precios

En base al trabajo de Cortazar-Gomez and Pineda-Guarín (2019) que utilizaron estadísticas de conectividad de la red de mercancías movilizadas por carretera como insumos para un modelo gravitacional de comercio, se hará uso de las mismas métricas (las vistas en la sección anterior) pero provenientes de las redes de k agrupaciones de productos agrícolas como predictores del su nivel de precios en diferentes municipios y en diferentes periodos de tiempo.

El objetivo de este trabajo consiste en explicar el efecto que tienen los eventos extremo-climáticos en las vías sobre el nivel de precios en los productos agroalimentarios a través de un aumento en los costos de transporte. Estas perturbaciones se representarán en el modelamiento como una variable *dummy* que toma el valor de 1 cuando ocurre un derrumbe cerca de las vías que conectan el municipio j con sus socios comerciales durante el periodo t . De esta manera, la función a modelar tendría la siguiente estructura:

$$P_{ijt} = P_{ij0} + \alpha X_{ijt} + \beta_1 \delta_{it} + \beta_2 shockclima_{ijt} \quad (1)$$

Donde:

$$X'_{ijt} = [\gamma_{ijt}^{in}, \gamma_{ijt}^{out}, \phi_{ijt}^{in}, \phi_{ijt}^{out}, \theta_{ijt}, \rho_{ijt}^{in}, \rho_{ijt}^{out}, \sigma_{ijt}] \quad (2)$$

La ecuación sugiere que el nivel de precios (P) de una agrupación de productos i en el municipio j durante el periodo t está en función del estado y estructura de la red de comercio de esa agrupación (δ_{it}), del estado del municipio dentro de la red (X_{ijt}) y de los choques climáticos durante el periodo sobre las vías que conectan al municipio con sus socios comerciales de productos i ($shockclima_{ijt}$). Los parámetros estimados mediante modelos panel representarán el efecto que tiene la integración de la red (β_1), el nivel de integración

del municipio dentro de la red (α) y finalmente los eventos climáticos en las vías (β_2) sobre los precios municipales de los diferentes productos agroalimentarios.

4. Datos y Fuentes de Información

4.1. Fuentes de Datos

La información para construir la red de comercio proviene del Registro Nacional de Despachos de Carga por Carretera (RNDC) del Ministerio de Transporte. Esta base de datos pública contiene la información de los despachos realizados mensualmente desde enero de 2015. En esta se detallan los movimientos de mercancía a nivel del municipio de origen, destino, clasificación de mercancía, el número de viajes realizados, la suma de los kilogramos/galones transportados, la suma de los kilómetros recorridos y finalmente el monto total de los fletes de los viajes.

Los datos del RNDC promedian cien mil registros mensualmente. En ellos se encuentra la información de las transacciones de mercancía entre los municipios de 31 de los 32 departamentos de Colombia, solamente excluyendo San Andrés y Providencia. La mercancía transportada se clasifica en 3580 partidas que, a su vez, se agrupan en 109 capítulos que abarcan todo tipo de productos, no solamente agroalimentarios.

Los datos de los precios mayoristas de los productos agrícolas que hacen parte de la canasta de consumo se recopilan en el Sistema de información de precios SIPSA del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) desde enero de 2012. Las series históricas del SIPSA registran los precios por kilogramo de 351 productos que se comercian en 79 centros de abastos en el país. Los productos se agrupan en: (1) verduras y hortalizas, (2) frutas, (3) tubérculos, raíces y plátanos, (4) granos y cereales, (5) lácteos y huevos, (6) carnes, (7) pescados y (8) procesados. Un limitante de esta base de datos es que existen departamentos sin información de centrales de abasto (ej. Amazonas) y no todas las centrales de abasto comercian los ocho grupos de productos.

Finalmente, los datos de derrumbes y otros eventos extremo-climáticos en la vía han sido los más difíciles de recolectar. En la actualidad se cuentan con reportes diarios en el

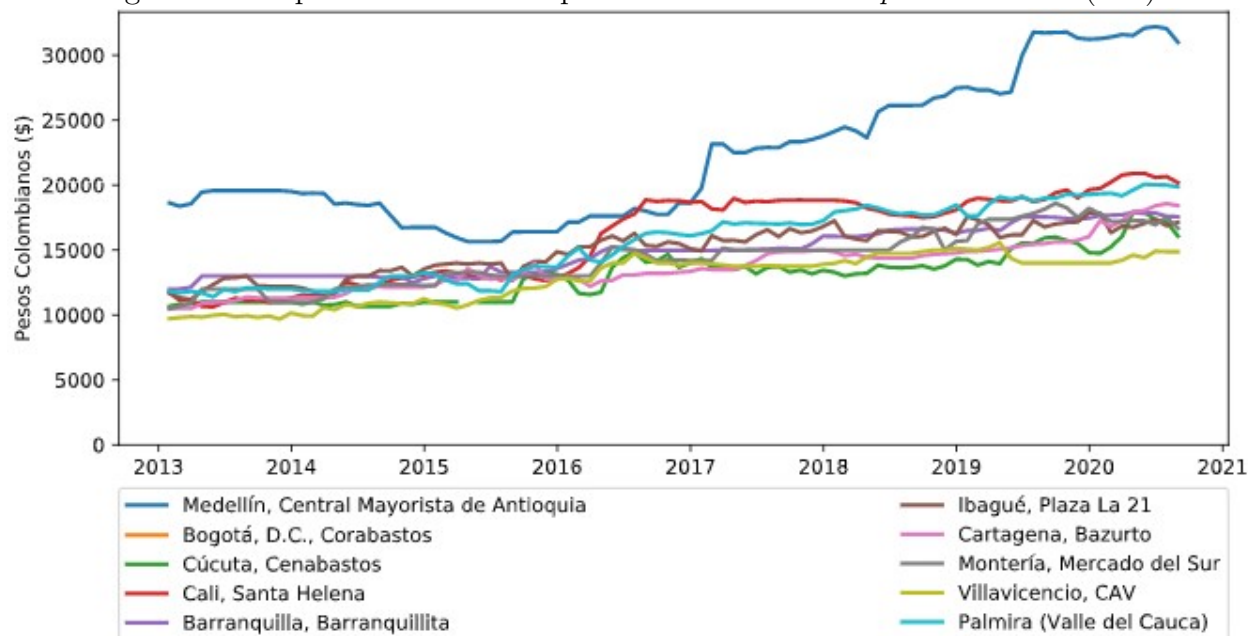
informe de vías DITRA suministrada por la Dirección de Tránsito y Transporte de la Policía Nacional, en él se encuentra el estado de las vías interrumpidas sea por algún derrumbe, deslizamiento u otro fenómeno que afecte la movilidad entre municipios, acompañado de su posición geográfica. La gran limitante de este informe, como se mencionó, es que no se cuenta con una historia disponible, por lo que queda descartada en el momento de redactar este trabajo. La fuente de información utilizada para el estudio proviene entonces del *Global Landslide Catalog* de la NASA, este se desarrolló con el objetivo de identificar los deslizamientos y derrumbes en el mundo a causa de la precipitación, sin importar el tamaño o lugar de ocurrencia. Para Colombia, se tienen los registros de derrumbes ocurridos desde mayo de 2006 a junio de 2019. La metodología de recolección de datos que conforma el catalogo se basa en un *web-scraping* de diferentes fuentes de información públicas; de ellas se extrae el país, la fecha del evento climático, la descripción textual del evento y locación, la categoría del deslizamiento (ej. derrumbe o caída de piedras), el tamaño relativo del deslizamiento (pequeño, mediano o grande), el municipio de ocurrencia, entre otras descripciones geográficas y de magnitud. Esta base de datos, aunque solo se centra en los eventos extremo-climáticos causados por la lluvia, debido a la falta de reportes, permite visualizar las tendencias en las distribuciones, magnitudes e impactos de los deslizamientos de tierra en el mundo (Kirschbaum et al., 2010). Los datos no demuestran explícitamente si el evento afectó alguna vía, pero con la georreferenciación de cada uno, es posible identificar cercanías con las coordenadas de infraestructura vial provenientes de los datos públicos de ESRI.

4.2. Análisis Descriptivo de los Datos

La evolución de los precios históricos de los productos agrícolas en las centrales de abastos de Colombia demuestra comportamientos que permiten una primera inferencia de la relación entre productos y municipios. En otras palabras, es posible observar que el precio de algunos alimentos es significativamente menor en ciertos municipios, lo que señalaría una mayor integración de ese municipio dentro de la red de comercio nacional de ese alimento. Un ejemplo del caso contrario (mayores precios) es el corte de punta de anca de res en Medellín, Antioquia. En la Figura 1 podemos observar que el precio de este corte de carne es significativamente superior en la central de abasto de Medellín a comparación de otras

centrales en municipios que, en teoría, tienen un mayor acceso a las zonas ganaderas por fuera de la región Andina (ej. costa pacífica o llanos orientales).

Figura 1: Comportamiento de los precios históricos de la *punta de anca* (Res).



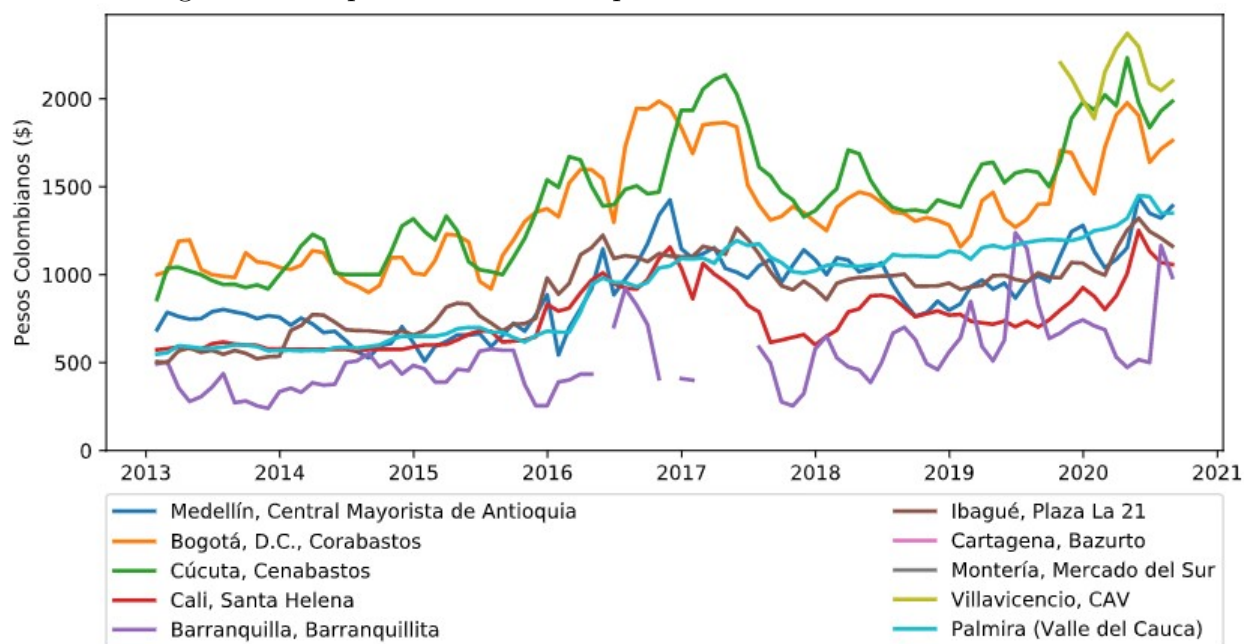
Elaboración propia a partir de los datos del reporte mensual SIPSA del DANE.

Otro producto que sirve de ejemplo para demarcar las diferencias significativas en su precio entre diferentes municipios es el *banano criollo*. En la Figura 2 vemos que el kilogramo del banano criollo se transa a niveles mucho menores en Barranquilla que en Bogotá, esto podría obedecer a la cercanía que tiene el primer municipio con la Zona Bananera del Magdalena y el acceso a Bogotá dificultado por la geografía montañosa de la región Andina.

Un aspecto a resaltar de la evolución de los precios de los diferentes tipos de alimentos es la diferencia en la estacionalidad entre ellos. Como se puede apreciar en la Figura 3, las FRUTAS, agrupación que constituye 88 productos, tienen una estacionalidad anual demarcada, evidenciando las estaciones climáticas anuales que obedecen la mayoría de las cosechas de este tipo de alimentos.

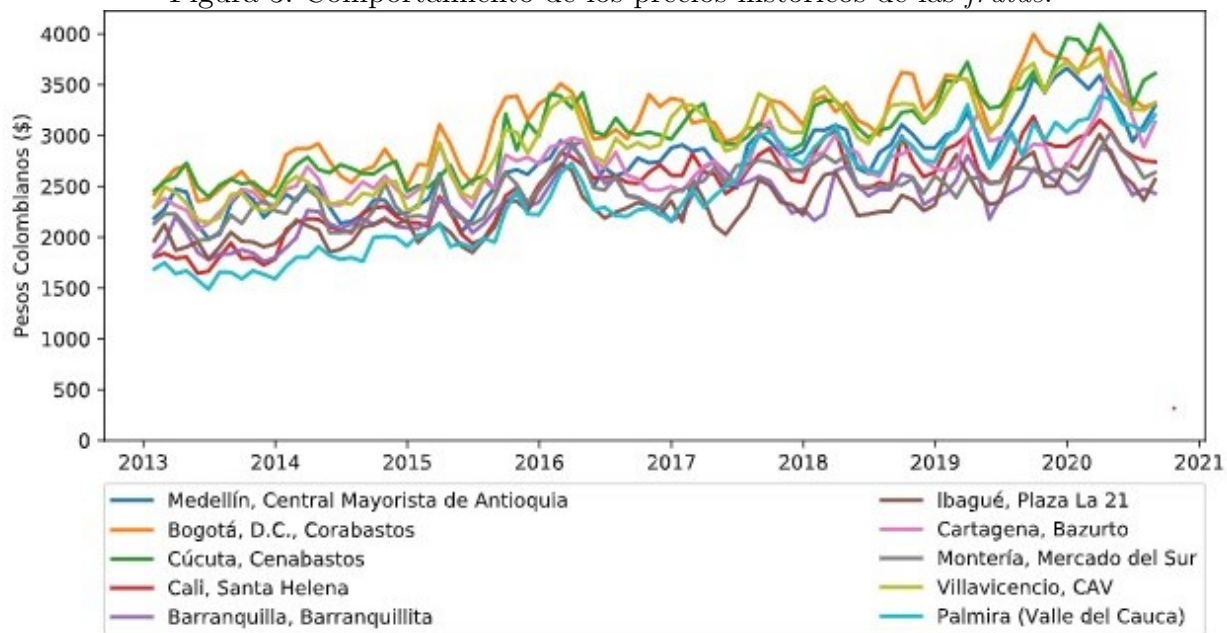
En contraste a la agrupación anterior, los TUBÉRCULOS, RAÍCES Y PLÁTANOS, que agrupan 42 productos, tienen una estacionalidad de mayor longitud. En la Figura 4 se puede observar que los precios de este tipo de alimentos han tenido dos picos significativos en las diferentes centrales de abastos, durante 2016 y 2019. En ambas fechas el detonante

Figura 2: Comportamiento de los precios históricos del *banano criollo*



Elaboración propia a partir de los datos del reporte mensual SIPSA del DANE.

Figura 3: Comportamiento de los precios históricos de las *frutas*.

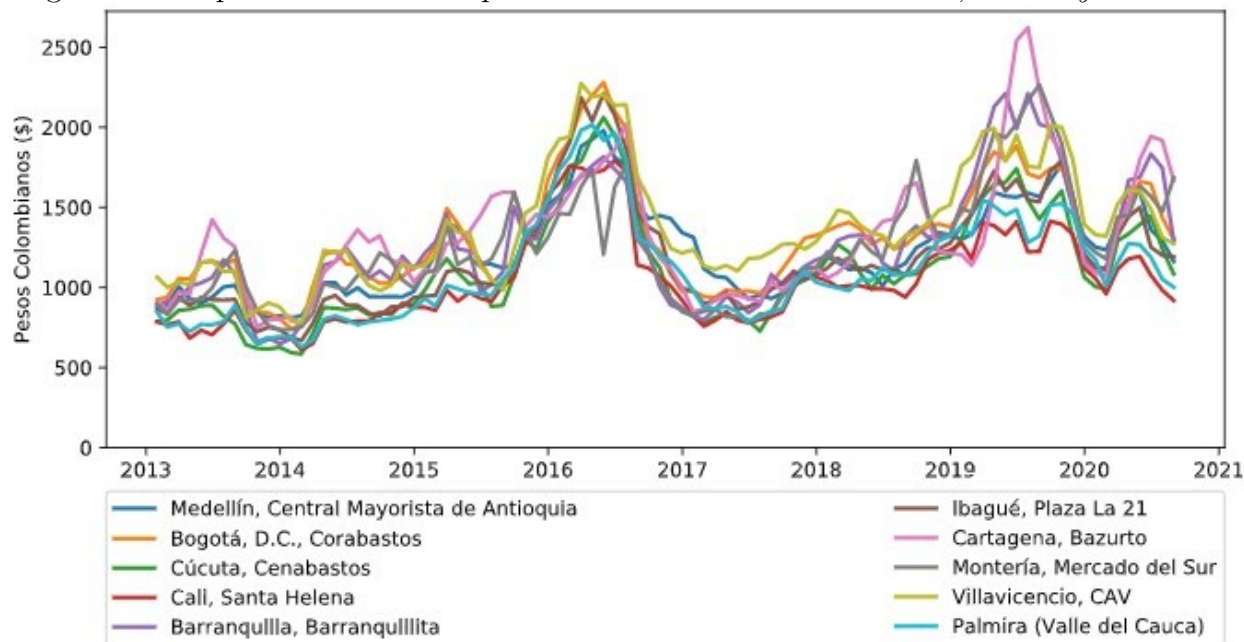


Elaboración propia a partir de los datos del reporte mensual SIPSA del DANE.

fue el fenómeno del Niño, que afecta negativamente las condiciones para el cultivo agrícola gracias a sequías y altas temperaturas. Estos análisis superficiales evidencian dos aspectos

relevantes del comportamiento de los precios de los alimentos. El primero es la diferencia significativa en el precio de un mismo producto entre diferentes municipios, como lo vimos para el caso de la carne de res. Es posible que estas diferencias obedezcan a la falta de integración de los municipios dentro de la red de comercio de este producto, que, en teoría, tiene como eje central al municipio que tiene la ventaja comparativa en la producción de este tipo de bien, y también por los retos de transportar ese producto desde ese eje por razones geográficas o de exposición a eventos extremo-climáticos que incrementen los costos de los fletes. El segundo aspecto son las diferencias en las estacionalidades de distintos tipos de alimentos, mientras algunos tienen precios con un ciclo anual marcado y no son susceptibles a temporadas climáticas extremas como *El Niño* o *La Niña* (ej. las frutas), otros si lo son aún sin tener un comportamiento cíclico anual (ej. tubérculos, raíces y plátanos).

Figura 4: Comportamiento de los precios históricos de los *Tubérculos, Raíces y Plátanos*.



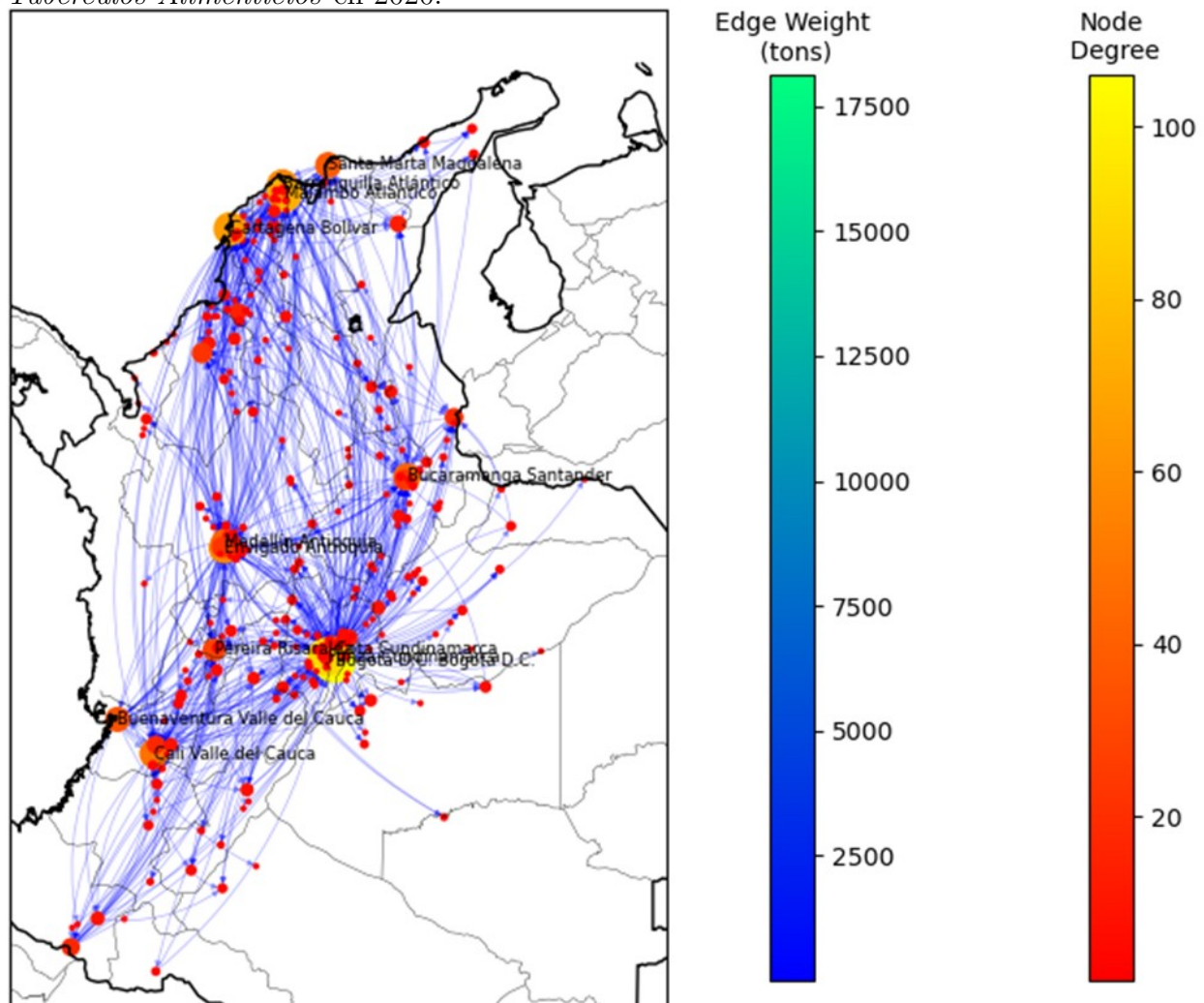
Elaboración propia a partir de los datos del reporte mensual SIPSA del DANE.

5. Análisis Topológico de Redes

El análisis temporal de las redes de comercio de productos agrícolas permite conocer la evolución de la integración y el papel que desempeña cada municipio en la red. Dado que

para cada producto en cada momento de tiempo se cuenta con una red diferente, tomamos el ejemplo de la red de comercio de LEGUMBRES Y HORTALIZAS; PLANTAS; RAÍCES Y TUBÉRCULOS ALIMENTICIOS en 2020 para representar gráficamente en la Figura 5 las características de la red. En este ejemplo los municipios están representados por nodos cuyo tamaño está en función de su grado (*degree*), es decir, del número de socios con los cuales comercia el municipio. Se puede observar que las capitales de los principales departamentos logran comerciar hasta con 100 municipios diferentes. Los flujos de comercio están representados por flechas que denotan la dirección del tránsito de la mercancía.

Figura 5: Red de comercio (vía carretera) de *Legumbres y Hortalizas; Plantas; Raíces y Tubérculos Alimenticios* en 2020.



Elaboración propia a partir de los datos del RNDC.

Esta red cuenta con 252 municipios conectados por 727 aristas, por lo tanto, la densidad (δ) de esta red es de 0,011. En perspectiva, si esta red se tratara de un grafo completo ($\delta = 1$), cada municipio exportaría e importaría con cada uno de los demás municipios. El coeficiente de agrupamiento promedio de la red es de 0.31, esto implica una posibilidad del 31 % que dos municipios, los cuales comercien con un municipio j , comercien entre ellos al mismo tiempo. Es de esperarse que ante una mayor densidad de la red de comercio de un producto i , menor sea la disparidad de precios entre los municipios por ese mismo producto. Las diferencias restantes solamente dependerían de los costos de transporte que están en función de la distancia, pero gracias a la mayor densidad, los márgenes de los intermediarios y costos de almacenamiento tenderían a desaparecer, y con ello una disminución en los precios finales del producto.

Cada nodo/municipio cuenta con características que lo distinguen dentro de la red. En la Tabla 1 se evidencian las estadísticas descriptivas para los 10 principales nodos de la red comercio, medidos por su intensidad de entrada. Bogotá y Barranquilla son los municipios con el mayor grado de entrada (γ_{in}) correspondiente a 27 municipios, es decir, el número de municipios de los cuales importan legumbres y tubérculos. Sin embargo, aunque ambos importen cerca de 30 mil toneladas (intensidad de entrada ϕ_{in}), el primer municipio exporta 38 mil toneladas (intensidad de salida ϕ_{out}) hacia 79 municipios (grado de salida γ_{out}) mientras que el segundo solo exporta 1200 toneladas hacia 29 municipios. Funza, al igual que Bogotá, cuenta con una balanza comercial positiva, aunque de 3 veces su tamaño, y más de 70 municipios a los cuales exporta. Esto permite inferir que estos dos municipios juegan un papel de intermediación importante en el mercado, reflejado además en los mayores índices de intermediación (σ) junto con Cartagena. El índice de intermediación de Bogotá señala que este está presente en el 11,8 % del total de los corredores de comercio entre los demás municipios de la red.

Un aspecto que destaca es el alto coeficiente de agrupamiento (θ) observado en los municipios de Cúcuta, Montería y Santa Marta. Aunque todos comparten similares números de mercancía entrante, los destinos de exportación principales de los dos primeros son internacionales; Cúcuta con Venezuela y Montería con Panamá, por lo que tienen bajos números de mercancía saliente hacia destinos nacionales. Santa Marta, por su parte, exporta princi-

Tabla 1: Estadísticas descriptivas de los principales nodos de la red de comercio de *Legumbres y Hortalizas; Plantas; Raíces y Tubérculos Alimenticios* en 2020.

MUNICIPIO	Grado de Entrada	Grado de Salida	Intensidad de Entrada	Intensidad de Salida
Bogotá D.C., Bogotá D.C.	27	79	33,228,396	38,012,627
Barranquilla, Atlántico	27	29	29,618,692	1,211,061
Medellín, Antioquia	24	17	18,491,780	287,849
Cartagena, Bolívar	25	40	14,026,838	6,964,027
Funza, Cundinamarca	13	77	13,826,894	27,074,334
Cali, Valle del Cauca	24	24	11,425,570	14,101,300
Bucaramanga, Santander	18	24	8,137,946	460,700
Santa Marta, Magdalena	12	26	4,693,579	16,381,972
Monteria, Córdoba	16	6	4,534,231	71,799
Cúcuta, Norte de Santander	15	3	4,381,566	23,700

MUNICIPIO	Coefficiente de Agrupamiento	Cercanía de Entrada	Cercanía de Salida	Intermediación
Bogotá D.C., Bogotá D.C.	0.075	0.221	0.544	0.118
Barranquilla, Atlántico	0.172	0.207	0.456	0.055
Medellín, Antioquia	0.181	0.208	0.384	0.035
Cartagena, Bolívar	0.131	0.207	0.474	0.065
Funza, Cundinamarca	0.061	0.184	0.533	0.067
Cali, Valle del Cauca	0.184	0.206	0.398	0.045
Bucaramanga, Santander	0.155	0.195	0.386	0.030
Santa Marta, Magdalena	0.227	0.180	0.447	0.016
Monteria, Córdoba	0.314	0.197	0.324	0.008
Cúcuta, Norte de Santander	0.427	0.195	0.297	0.005

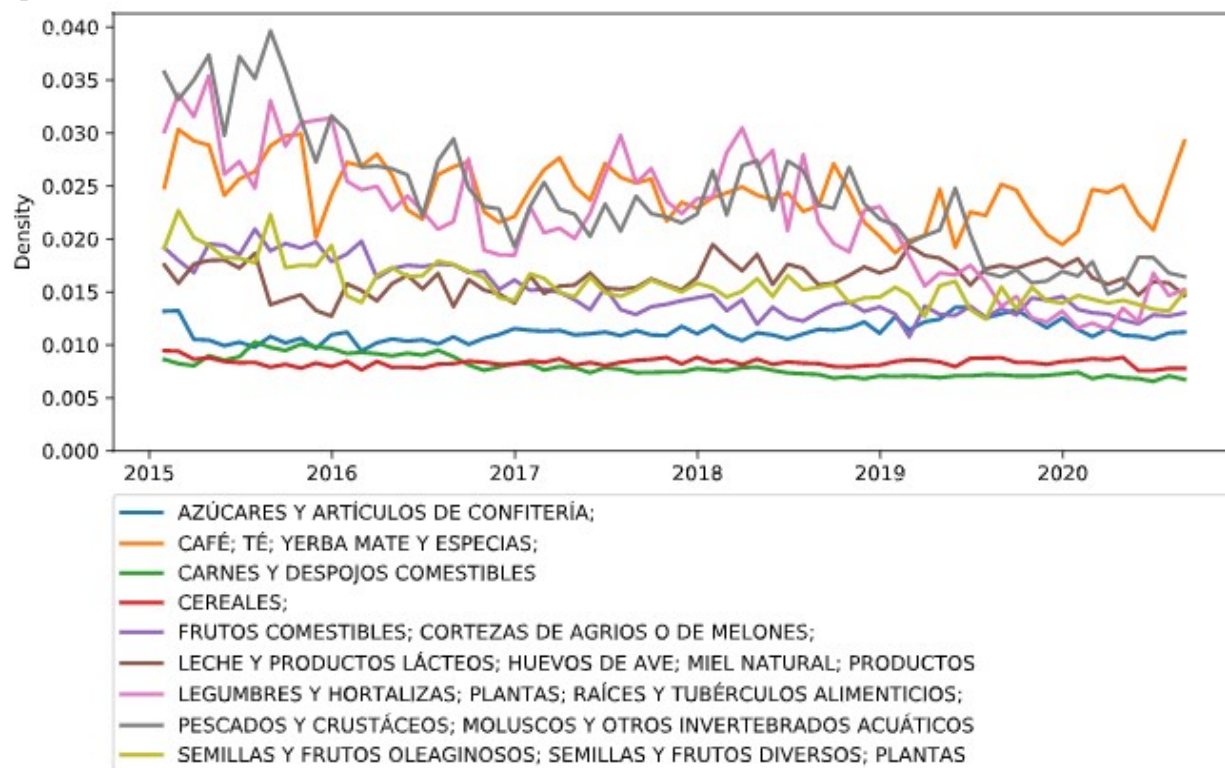
Elaboración propia a partir de los datos del RNDC.

palmente a otros municipios de Colombia. Los tres municipios, sin embargo, comparten la característica de que sus socios comerciales son al mismo tiempo socios entre ellos, formando agrupamientos o clústeres de comercio. No es descabellado afirmar que estos clúster se dan en regiones especializadas en la producción de un tipo de bien, en este caso de legumbres y tubérculos.

El análisis topológico de la red de comercio de legumbres y tubérculos en 2020 nos permitió comprender las principales características descriptivas de redes que se utilizaran como insumos para el modelamiento del precio final de estos alimentos en las centrales de abasto de diferentes municipios. Ahora bien, otro análisis que podemos realizar es a partir del

comportamiento de las mismas métricas descriptivas de la red a través del tiempo y de esta manera identificar temporadas de alta o baja integración de los distintos mercados.

Figura 6: Comportamiento histórico de la *densidad* de la red de comercio de los distintos tipos de alimentos.



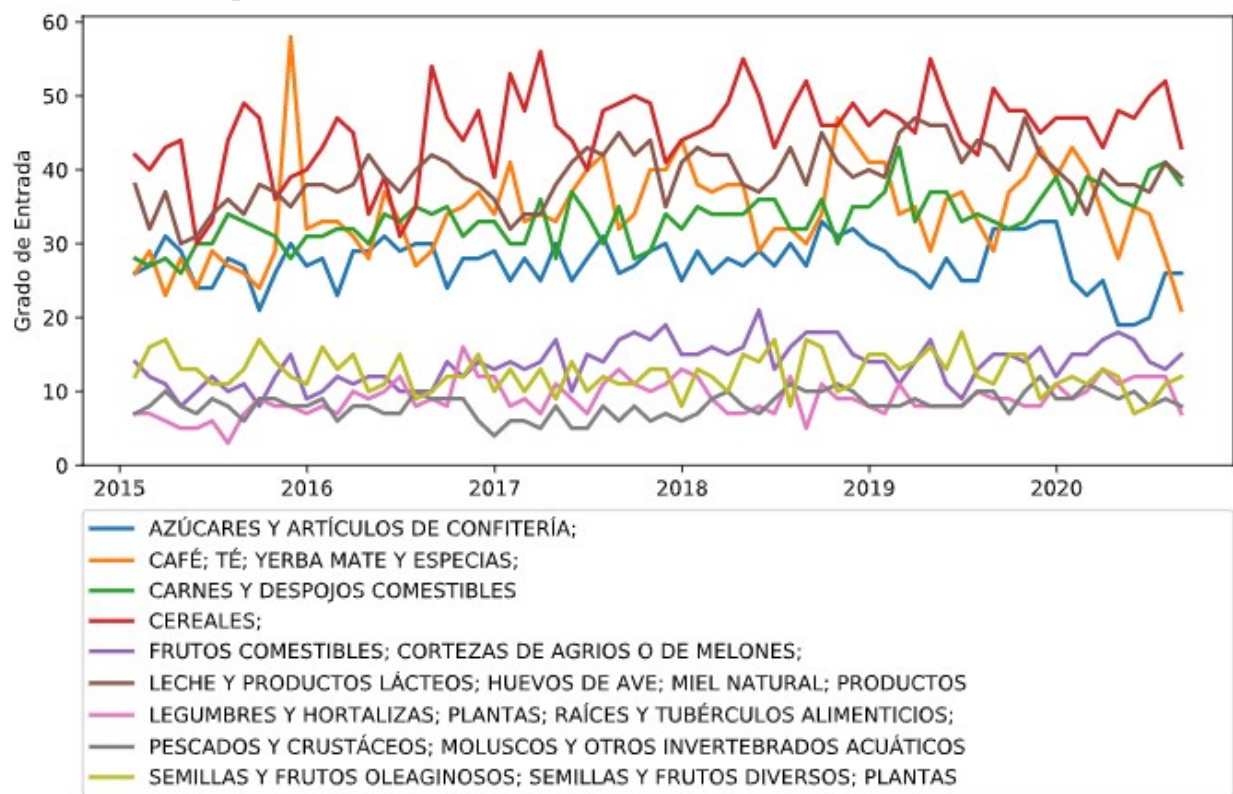
Elaboración propia a partir de los datos del RNDC.

En la Figura 6 es posible observar el contraste de la evolución de la densidad de las redes de comercio de los distintos tipos de alimentos. Los mercados con menor densidad, el de carnes y cereales, son los que han tenido poco o nulo cambio en este indicador. Esto evidencia que durante los periodos de la muestra no ha cambiado la relación del número de municipios participantes del mercado, sea como productores o consumidores, con el número de corredores de comercio que los conectan. Destaca, sin embargo, que estos dos mercados son los que más municipios participantes (nodos) y corredores de comercio (vértices) tienen.

Por otro lado, los mercados de derivados de la pesca y el de legumbres, hortalizas y tubérculos, ha tenido un decaimiento en su densidad desde el 2015 hasta el presente. En ambos casos, esto se explica por un crecimiento del número de municipios participantes

junto con un estancamiento en el número de los corredores principales de comercio, es decir, los municipios que han entrado al mercado no tienen conexión directa con los municipios productores, sino que recurren a municipios intermediarios (ej. Bogotá o Funza) para acceder a este tipo de productos. Esto, en definitiva, aumenta el alcance del mercado del producto, sin embargo, se esperaría que estos municipios entrantes experimenten precios mayores por su dependencia a uno o pocos municipios intermedios.

Figura 7: Comportamiento histórico del *grado de entrada* de Medellín en la red de comercio de los distintos tipos de alimentos.



Elaboración propia a partir de los datos del RNDC.

De igual manera, el análisis temporal de las estadísticas descriptivas de los nodos de la red se puede realizar para cada municipio. La evolución de algunas de estas variables da indicio del cambio en la integración del municipio dentro de la red en el tiempo. Por ejemplo, en la Figura 7 se puede observar el comportamiento del grado de entrada de Medellín, esta variable señala el número de municipios de los cuales este obtiene cada tipo de producto. La hipótesis de este trabajo señala que entre mayor sea este número, mayor resiliencia tendrá

el mercado de Medellín ante perturbaciones climáticas, esto debido a que posee un amplio número de fuentes de las cuales puede obtener el tipo de producto si la conexión a una de ellas estuviera comprometida.

Sin embargo, un mayor número de municipios de origen también indica una posible falta de especialización en la producción del bien, como puede ser el caso de los cereales en Medellín, o en el caso contrario, los derivados de la pesca. Estos últimos, Medellín los obtiene de relativamente pocos municipios, pero se sabe que la pesca es una actividad que principalmente se da en municipios costeros que cuentan con un grado alto de especialización, que se refleja en menores precios del producto en los mercados finales. No obstante, la dependencia de la producción de unos cuantos municipios se refleja en una dependencia a pocos corredores de comercio o vías para transportar la mercancía, aumentando la sensibilidad de los precios hacia fenómenos extremo-climáticos que anulen estos corredores.

6. Resultados del Modelamiento del Nivel de Precios

Para medir el efecto de la topología de la red de comercio y los eventos extremo-climáticos en las vías sobre los niveles de precios de los alimentos en los mercados finales se utilizaron métodos de estimación tipo panel. La variable endógena es el logaritmo del nivel de precios y las variables explicativas se encuentran en niveles. El *id* de la estimación se construyó a partir de la combinación de los municipios con los tipos de productos. Los resultados de las estimaciones se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

Con el fin de probar la existencia de efectos inobservables entre los individuos de la muestra y lograr inferencias estadísticas insesgadas, se realizó la prueba de Breusch-Pagan para determinar la presencia de heterocedasticidad en los residuales de la estimación por Efectos Aleatorios. La prueba tiene como hipótesis nula la no existencia de diferencias significativas entre los individuos y, por ende, que las estimaciones realizadas por Pooled OLS son más eficientes que por Efectos Aleatorios.

El resultado de la prueba señaló el rechazo de la hipótesis nula con un *p-valor* muy cercano a 0 (3,7e-89), por lo que las estimaciones por Pooled OLS son sesgadas y soporta la presencia de efectos inobservables. Ahora bien, es importante determinar si los efectos

Tabla 2: Resultados de la regresión.

Variable	Pooled OLS	Efectos Aleatorios	Efectos Fijos
Constante	7.0417*** (0.0726)	8.0614*** (0.0505)	8.151*** (0.0239)
Grado de Entrada	0.0257*** (0.0012)	0.0004 (0.0007)	0.0001 (0.0007)
Grado de Salida	0.0006 (0.0006)	0.0016*** (0.0003)	0.0016*** (0.0003)
Intensidad de Entrada	-0.0013*** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)
Intensidad de Salida	-0.0003*** (0.0)	-0.0001** (0.0)	-0.0001** (0.0)
Coeficiente de Agrupamiento	-0.0008*** (0.0003)	0.0001* (0.0001)	0.0001 (0.0001)
Cercanía de Entrada	-0.0299*** (0.0015)	0.0039*** (0.0007)	0.004*** (0.0007)
Cercanía de Salida	0.0077*** (0.0005)	-0.0004** (0.0002)	-0.0004** (0.0002)
Intermediación	-0.0275*** (0.0034)	-0.0022 (0.0016)	-0.0022 (0.0016)
Derrumbes	0.0002 (0.0002)	-0.0002*** (0.0)	-0.0002*** (0.0)
Número de Nodos	0.0087*** (0.0003)	0.0007*** (0.0001)	0.0006*** (0.0001)
Número de Aristas	-0.0018*** (0.0001)	0.0001*** (0.0)	0.0001*** (0.0)
Densidad	0.4863*** (0.0226)	-0.0254*** (0.0063)	-0.0266*** (0.0063)
Observaciones	13203	13203	13203
R-cuadrado	0.1755	0.1902	0.0934
Significancia Estadística (p-valor <): 0.01 ***, 0.05 **, 0.1 *			

inobservables son ortogonales con las variables explicativas del modelo, es decir, que las características inobservables del mercado de los productos en los municipios (ej. percepción y preferencia de los hogares) estén correlacionadas con la topología de la red de comercio, el papel de los mismos dentro de ésta o los derrumbes en las vías primarias directas. Para ello se realizó la prueba de Hausman, que tiene como hipótesis nula la inexistencia de diferencias significativas entre las estimaciones por Efectos Aleatorios y Efectos Fijos. El resultado de

la prueba no rechaza la hipótesis nula, lo que evidencia a favor del supuesto de los Efectos Aleatorios que no existe correlación entre las características inobservables y los regresores exógenos y, por ende, su estimación es consistente.

Después de validar la consistencia y eficiencia de los diferentes modelos, observamos que los efectos de las características de la red de comercio a nivel general y municipal sobre los precios son, en su mayoría, poco significativos en las estimaciones por Efectos Aleatorios y Efectos Fijos. La nula significancia del coeficiente asociado al grado de entrada señala que el número de municipios de los cuales se importan productos agrícolas no tiene impacto sobre el nivel de precios, sin embargo, la cantidad de producto entrante logra reducir significativamente el nivel de precios cuando es muy alta, por cada cien toneladas entrantes, el precio disminuye en 0,03 %. Por otro lado, a mayor número de municipios a los cuales se exporta, mayor es el precio en el mercado local, por cada 10 municipios que se exporte, el precio aumenta en 1,6 %.

Las métricas que indican la centralidad del municipio en la red de comercio no tienen incidencia importante sobre el nivel de precios. De igual manera, el hecho de que exista un derrumbe cerca de las vías primarias que conectan los municipios con sus socios comerciales tampoco tiene efecto sobre el nivel de precios en sus mercados. Sin embargo, entre las variables explicativas que consideramos, destaca la densidad de la red de comercio, cuyo incremento en 0.01 logra reducir los precios en 2,5 %.

El R-cuadrado de todos los modelos demuestra que la variación del nivel de precios de los productos en los municipios permanece, en su gran mayoría, inexplicable por las métricas de integración del comercio y fenómenos extremo-climáticos.

En resumen, el precio, como mecanismo de ajuste de cualquier mercado, está afectado por perturbaciones de oferta o demanda y los mercados municipales de productos agrícolas no son la excepción a la regla, como lo muestran los gráficos previamente expuestos. Los resultados demuestran que la topología de la red de comercio y los eventos climáticos en las vía primarias logran explicar una fracción minoritaria del comportamiento de los precios agrícolas en los mercados finales. Además, los coeficientes asociados a las características de los municipios dentro de la red de comercio señalaron que su variación no tiene incidencia significativa sobre los precios, mientras que la densidad de la red, como medida de integración

en de los mercados, tuvo el mayor efecto. Esto nos indica que entre más municipios participen activamente dentro de la red de comercio, los precios tenderán a disminuir en todo el país, explicado por la mayor competencia, cantidades y variedades disponibles. Por otro lado, los derrumbes cercanos a las vías que conectan a los municipios con sus socios comerciales no mostraron mayor incidencia sobre los precios finales. Esto puede indicar que el efecto de los derrumbes “corrientes” detonados por la lluvia no se comparan al efecto que tienen fenómenos climáticos más severos como *El Niño* o *La Niña* que pueden perdurar por varios meses y sus impactos a la red vial se reflejan en cierres más largos y totales.

7. Conclusiones y Consideraciones Finales

El fin de este trabajo era comprender las disparidades de los precios entre los municipios en función de la integración del mercado nacional y las perturbaciones climáticas con el fin de determinar si en los municipios más periféricos de la red de comercio, donde viven las poblaciones más expuestas a la inseguridad alimentaria, tienen alimentos más costosos y dependientes del clima. Como medio para lograr ese fin, se hizo uso de métricas de topología de redes para representar la integración y se identificaron los corredores viales que pudieron verse afectados por derrumbes a través de la georreferenciación. Los datos para construir la red se constituyeron en su totalidad del comercio municipal por carretera, que representa la gran mayoría del comercio total en Colombia. Los corredores de comercio estaban dados por la red vial primaria, que constituye las principales troncales y autopistas que conectan los municipios. De esta manera, con la información recolectada de derrumbes ocasionados por lluvia, se pudo determinar cuáles coordenadas de las vías estaban dentro de un radio a la ocurrencia de un derrumbe (5 km) y así identificar los municipios que se vieron afectados.

Esta información fue el insumo para un modelo econométrico que busca explicar el nivel de precios de los alimentos en las centrales de abasto de los municipios. Los resultados demostraron que el papel del municipio dentro de la red de comercio, en cuanto a la cantidad de socios comerciales, cantidad importada o exportada de producto y su centralidad, no tiene mayor efecto sobre los precios finales. Sin embargo, la densidad de la red de comercio, que considera qué tan integrados están los municipios participantes, sí tiene un efecto negativo

y significativo sobre el precio. Los derrumbes, por otro lado, no demostraron incidencia significativa sobre el nivel de precio de los distintos productos. Este resultado, a comparación de la evidencia recopilada en el Plan de Vías del Ministerio de Ambiente (2014) del efecto sobre el comercio nacional ocasionado por el fenómeno de La Niña, indica que posiblemente los derrumbes “corrientes” de escala local no tienen la incidencia que logran tener fenómenos climáticos más pronunciados y duraderos.

Entre los limitantes de este trabajo se encuentra el uso exclusivo de la red vial primaria para construir los corredores de comercio, que solamente comprende el 8 % del total de las vías del país (Minambiente, 2014). Aun así, esta red sirve como insumo de partida para comprender las conexiones entre los municipios principales, sin embargo, carece de conexiones viales municipales a una escala que permita articular la red en función de las cercanías geográficas. Este trabajo intentó combatir este limitante por medio de modelos de agrupación no supervisados (*k-medias*) para complementar artificialmente la red vial primaria con vértices que conecten municipios cercanos. Aun así, solamente con este insumo, las conexiones municipales permanecen en su mayoría inexploradas y con ello una amplia gama de rutas y corredores de comercio entre los municipios.

Este trabajo analizó a una escala nacional el impacto climático y la integración del mercado sobre el precio promedio de diferentes agregaciones de productos que comprenden la totalidad de la producción agrícola en Colombia. Esta generalidad probablemente tuvo incidencias en los resultados del modelo por dos razones. La primera es que las agrupaciones consideran decenas de productos alimenticios cuya producción y origen puede diferir de municipio, obviando características topológicas particulares de la red de comercio de cada producto. Y en segundo lugar, los precios individuales dentro de las agrupaciones probablemente no comparten un mismo comportamiento, de esta manera pasando por alto la sensibilidad individual del precio de cada producto.

Finalmente, este trabajo logra tres conclusiones significativas. En primer lugar, demuestra que para disminuir el riesgo de inseguridad alimentaria en Colombia es necesario facilitar, por medio de infraestructura más incluyente, las conexiones comerciales directas entre los municipios, permitiendo de esta manera la oferta de alimentos asequibles a las poblaciones más pobres. Segundo, los derrumbes cuyo efecto sobre la vía no demora más de un mes, no

demuestran tener un efecto significativo en los precios en los mercados finales. Y finalmente, evidencia que los insumos basados en la topología de redes logra caracterizar la integración de los mercados y el papel que desempeña cada agente dentro de ellos, y de esta manera ser una herramienta útil para el modelamiento de diferentes fenómenos económicos no solamente niveles de precios.

Referencias

- Adamopoulos, T. (2011). Transportation costs, agricultural productivity, and cross-country income differences. *International Economic Review*, 52(2):489–521.
- Cardoso, F., Gracia-Lázaro, C., Moisan, F., Goyal, S., Sánchez, A., and Moreno, Y. (2020). Effect of network topology and node centrality on trading. *Scientific Reports*, 10(1).
- Cortazar-Gomez, D. and Pineda-Guarín, J. (2019). Red de comercio departamental en colombia: Enfoque gravitacional y análisis topológico de redes. *Documentos de Trabajo sobre Economía Regional y Urbana*, (285).
- DNP (2019). Plan nacional de desarrollo 2018-2022.
- Dolfing, A., Leuven, J., and Dermody, B. (2019). The effects of network topology, climate variability and shocks on the evolution and resilience of a food trade network. *PLoS ONE*, 14(3).
- Gafaro, M. and Pellegrina, H. (2018). Market access, agricultural productivity and selection into trade: evidence from colombia. *Borradores de Economía*, (1050).
- Kirschbaum, D., Adler, R., Hong, Y., Hill, S., and Lerner-Lam, A. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. *Natural Hazards*, 52(3):561—575.
- Minambiente (2014). Plan vías-cc vías compatibles con el clima.

- Porteous, O. (2019). High trade costs and their consequences: An estimated dynamic model of african agricultural storage and trade. *American Economic Journal: Applied Economics*, 11(4):327—366.
- Rajeev, M. and Nagendran, P. (2020). Understanding regional variation in fish prices: evidence from a developing economy. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*, 10(4):472–492.
- Salazar, C., Ayalew, H., and Fisker, P. (2019). Weather shocks and spatial market efficiency: Evidence from mozambique. *Journal of Development Studies*, 55(9):1967–1982.
- Schaub, S. and Finger, R. (2020). Effects of drought on hay and feed grain prices. *Environmental Research Letters*, 15.
- Wu, Q., Guan, X., Zhang, J., and Xu, Y. (2019). The role of rural infrastructure in reducing production costs and promoting resource-conserving agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18).